

## Kajian numerik distribusi udara pada ruang ber-AC untuk mencapai tingkat efisiensi energi yang optimal

*Numeric analysis of air distribution in air-conditioned room to obtain optimum energy efficiency level*

**Jackobus Ade Prasetya Seputra**

*Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta  
Jl. Babarsari no. 44, Yogyakarta 55281, Indonesia*

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i> Received October 23, 2018 Received in revised form Nov. 03, 2018 Accepted November 26, 2018 Available online December 01, 2018</p>	<p><i>The demand for household energy in Indonesia is dominated by air conditioning sector. One of the efforts to optimize air conditioner (AC) is to figure out the best air distribution pattern. Nowadays, there are three air distribution types of marketed AC; (1) perfect mixing, (2) displacement, and (3) radiant cooling. This research examines the influence of those types toward energy consumption to ensure indoor thermal comfort. It was conducted by conducting literature review, mathematical calculation, and numerical simulation. Based on SNI 03-6572-2001, the research applied comfort criteria of indoor air temperature of 24oC as setpoint with 28.1oC initial temperature. Energy consumption is estimated based on time required to achieve the setpoint. The fastest cooling time is obtained by displacement in 80 seconds, then perfect mixing in 112 seconds, and the longest is radiant cooling in 460 seconds. Energy calculation establishes three scenarios of heat load represented by air con's idle time; (a) high load, 30 seconds, (b) moderate load, 60 seconds, and (c) low load, 90 seconds. For 300 hours of operational time per month, displacement consumes (a) 148.4, (b) 116.6, and (c) 96 kWh/month, whilst perfect mixing needs (a) 160.9, (b) 132.8, and (c) 113.1 kWh/month. Lastly, radiant cooling spends (a) 191.5, (b) 180.5, and (c) 170.6 kWh/month.</i></p>
<p><i>Keywords:</i> Energy efficiency Air conditioning Air distribution pattern</p>	
<p><b>Corresponding author:</b> Jackobus Ade Prasetya Seputra Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia Email: <a href="mailto:ad3_prasetya@yahoo.com">ad3_prasetya@yahoo.com</a></p>	

## Pendahuluan

Dewasa ini, 60% kebutuhan energi dunia terdapat pada bangunan rumah tangga (U.S. Energy Information 2015). Sedangkan, negara dengan iklim tropis seperti Indonesia memiliki kebutuhan energi untuk pendinginan ruang yang berkontribusi besar pada konsumsi rumah tangga ketika mesin AC digunakan (Surahman and Kubota 2012). Sebuah kajian serupa menemukan bahwa masyarakat di Indonesia cenderung membeli unit AC ketika pendapatannya meningkat sehingga dapat membayar biaya listrik yang lebih tinggi (Mori et al. 2015). Temuan-temuan tersebut kemudian mendorong maraknya

upaya-upaya penghematan energi pemakaian AC pada sektor rumah tangga di Indonesia (JICA 2009). Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah dengan mempertimbangkan pengaturan pola distribusi aliran udara menggunakan variabel pengendali *airflow rate*, *airflow direction*, dan *airflow pattern*. Pengaturan dari variabel-variabel ini kemudian diterapkan dalam tiga konsep distribusi aliran udara yang ada di pasaran, yaitu: (1) *perfect mixing*, adalah metode distribusi udara konvensional untuk mengatur kondisi ruang yang menyuplai udara dari ketinggian langit-langit dengan kecepatan tinggi dengan tujuan meratakan persebaran suhu dan polutan dalam ruang (Shan et al. 2016); (2) *displacement*, adalah metode

yang mengalirkan udara segar dari bawah ruang dengan memanfaatkan efek apung (*buoyancy*) dalam mengalirkan udara beserta kontaminannya menuju langit-langit untuk dikeluarkan (Chakroun, Ghali, and Ghaddar 2011), sehingga ruang terbagi menjadi dua area; area dasar ter huni yang segar dan dingin, serta area atas yang terkontaminasi dan hangat (Ayoub, Ghaddar, and Ghali 2006), (Mossolly et al. 2008), serta (3) *radiant cooling*, tipe pendinginan pelingkup dengan cara mengarahkan udara sejuk menuju pelingkup tersebut untuk menghilangkan kalor sensibelnya melalui mekanisme pertukaran kalor radiatif (Feng, Schiavon, and Bauman 2013).

Saat ini belum banyak penelitian yang membandingkan kinerja tipe distribusi udara AC *perfect mixing*, *displacement*, dan *radiant cooling* menggunakan simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Suatu studi kinerja AC dilakukan dengan menggunakan *software* FLUENT bermodel turbulensi RNG k-1 yang tervalidasi oleh data eksperimen laboratorium untuk mengamati pengaruh plafon yang didinginkan (*cooled ceiling*) terhadap kinerja tipe *displacement* (Qiu-Wang and Zhen 2006). CFD juga dimanfaatkan untuk membandingkan ventilasi *perfect mixing* dan *displacement* pada kedua periode pendinginan dan pemanasan ruang dengan memperhatikan penghematan energi, kenyamanan termal, dan kualitas udaranya (Serra and Semiao 2009). Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan teknik CFD dalam program FDS (*Fire Dynamic Simulation*) untuk menyajikan perbandingan langsung ketiga tipe distribusi udara AC di atas terhadap pengaruhnya dalam mengoptimasi pemakaian energi sekaligus mencapai kondisi kenyamanan termalnya.

## Metode penelitian

Penelitian mengadopsi pendekatan rasionalistik dilengkapi dengan pengukuran lapangan. Data hasil pengukuran lapangan kemudian dipakai sebagai acuan validasi program FDS untuk mendapatkan tingkat persetujuan (*agreement*) yang baik antara kondisi riil dengan hasil simulasinya. Selanjutnya, metode simulasi numerik dengan FDS digunakan untuk mendapatkan waktu pendinginan yang dibutuhkan oleh masing-masing tipe distribusi udara teruji (*perfect mixing*, *displacement* dan *radiant cooling*) agar mencapai suhu ruang ideal

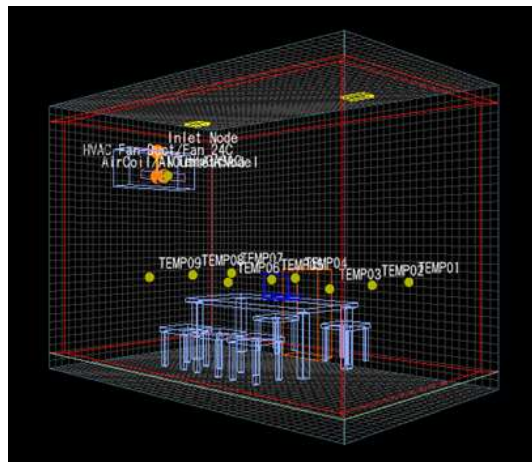
ber-AC 24°C. Akhirnya, waktu pendinginan tersebut diolah secara matematis dengan tujuan memperkirakan besarnya konsumsi energi dan biayanya dalam rupiah sesuai tarif listrik PLN (Perusahaan Listrik Negara) tahun 2018 berkategori rumah tangga non subsidi bulan April-Juni 2018, yaitu Rp 1.467,28/kWh.

## Validasi program FDS

Sampel ruang untuk keperluan validasi dan simulasi FDS adalah ruang kerja interior berukuran 3 × 5 meter dengan jarak lantai ke plafon 3 meter milik kantor Vastu Cipta Persada Architects di Jalan HOS Cokroaminoto no. 225, Yogyakarta (Gambar 1). Ruang ini berupa ruang dalam ruang sehingga diasumsikan tidak mendapatkan panas dari luar ruangan. Adapun mesin AC yang dipasang berspesifikasi teknologi *low-wattage*, kinerja mesin 1 PK (*paar de kraft*), berdaya listrik 680 Watt, dan bertipe distribusi udara *perfect mixing*.



Gambar 1. Ruang kantor VCP architects



Gambar 2. Model validasi FDS

Pengukuran lapangan dilakukan dengan alat-alat ukur fisik termal anemometer, stopwatch, dan HOBO data *logger* dengan posisi seperti pada Gambar 2. Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan hembusan udara dari *blades* AC, stopwatch diaktifkan untuk merekam waktu saat dilakukan pengukuran, dan HOBO data *logger* dinyalakan untuk secara otomatis mencatat kejadian suhu udara yang tersebar merata pada 9 titik berketinggian 1 meter dari permukaan lantai ruang uji. Sesuai dengan metode validasinya, data-data lingkungan yang didapatkan tersaji pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil pengukuran parameter lingkungan dalam ruang ber-AC

No.	Variabel Pengukuran	Angka Pengukuran
<i>Initial Condition</i> Ruang		
1.	Suhu udara	28,1°C
2.	Kecepatan Angin	0 m/s (asumsi berdasarkan tidak adanya aliran udara dalam ruang)
Pengukuran AC (2 Menit setelah Menyalakan AC)		
1.	Suhu udara	15,7°C
2.	Kecepatan <i>Fan</i>	2,5 m/s
Pengukuran untuk Mencapai Kenyamanan Termal		
1.	Suhu udara	24°C Stabil
2.	Waktu	135 s

Hasil pengukuran diatas kemudian diterapkan sebagai kondisi batas (*boundary condition*) pada simulasi numerik dengan program komputer FDS untuk mengetahui tingkat keakuratannya. Tabel 2 berikut merupakan perbandingan pengukuran validasi di lapangan dengan simulasi FDS.

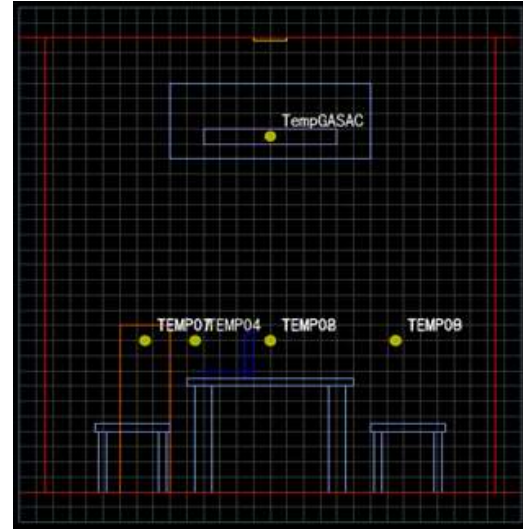
**Tabel 2.** Perbandingan hasil pengukuran lapangan dengan simulasi FDS

Parameter Pengukuran	Hasil Pengukuran	Hasil Simulasi	Agreement (%)
Suhu udara AC (setelah 120 s)	15,7°C	15,54°C	1,019
Kecepatan Angin AC (setelah 120 s)	2,5 m/s	2,74 m/s	4
Waktu hingga Mencapai 24°C	137 s	128 s	5,18
Rata-rata Tingkat Agreement			3,39

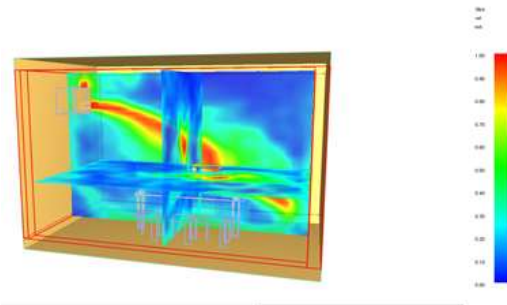
Dengan demikian, berdasarkan perhitungan tingkat *agreement* di atas (3,39%, atau dibawah 5%) maka dapat dibuktikan bahwa *software* FDS ini valid digunakan sebagai metode simulasi yang mampu mereplika kondisi lingkungan nyatanya.

## Temuan dan pembahasan

Selanjutnya dilakukan pengujian dengan FDS pada tiga skenario simulasi, yaitu simulasi ruang ber-AC dengan pola distribusi *perfect mixing*, *displacement* dan *radiant cooling*. Masing-masing disimulasikan untuk mengetahui waktu yang diperlukan hingga mencapai kondisi nyaman termal, yaitu suhu udara 24°C.



**Gambar 3.** Tampak depan model ruang simulasi AC *perfect mixing*



**Gambar 4.** Pergerakan angin sumbu X, Y, Z, hasil simulasi AC *perfect mixing*

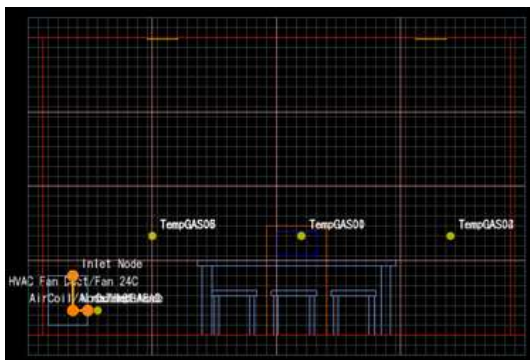
Simulasi pola distribusi AC *perfect mixing* dilakukan dengan model FDS seperti pada Gambar 3. Dalam simulasi, AC diletakkan pada ketinggian 2,2-meter dengan *lowered vent* yang mengarahkan udara dingin untuk bercampur langsung ke dalam ruangan (Gambar 4). Pita warna bergradasi biru, cyan, hijau, kuning, dan merah menunjukkan kecepatan angin yang terjadi dengan skala 0,0-1,0 m/s. Adapun kompilasi data

hasil simulasi *perfect mixing* tersusun pada Tabel 3 di bawah ini.

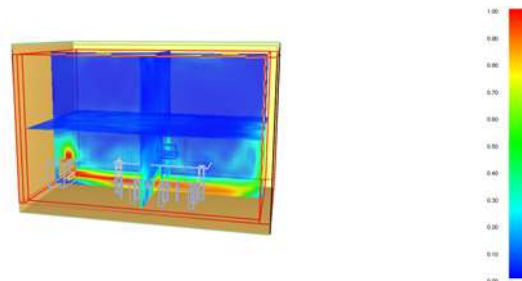
**Tabel 3.** Hasil simulasi suhu udara AC *perfect mixing* di tiap *probe* berdasar waktu

Waktu (s)	Suhu udara Probe (TEMP-) (°C)									Rata-Rata (°C)
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	
0	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
10	27,96	27,96	27,96	26,21	28,33	27,96	27,95	27,95	27,95	27,80
20	26,76	27,30	26,73	26,83	21,24	27,63	27,04	27,37	27,27	26,46
30	26,40	27,20	26,45	25,76	22,95	27,01	27,01	27,12	27,00	26,32
40	26,27	26,38	26,13	26,00	24,68	26,75	26,93	26,80	26,82	26,30
50	25,98	26,19	25,70	24,75	24,77	25,41	26,26	26,47	26,73	25,80
100	24,47	24,01	24,00	24,50	20,80	25,12	24,78	24,88	25,10	24,18
110	24,06	24,42	23,56	25,08	22,50	24,14	24,76	24,83	24,58	24,21
111	22,50	25,00	24,14	24,27	24,06	23,56	24,83	24,76	24,58	24,18
112	22,89	24,59	23,41	23,70	23,83	23,67	24,83	24,81	24,56	24,03
113	20,21	24,10	24,24	24,15	24,17	23,53	24,84	24,69	24,59	23,83
114	21,84	24,88	23,74	22,30	24,31	23,48	24,85	24,49	24,63	23,83
115	21,31	24,82	23,48	23,66	24,37	23,07	24,86	24,45	24,65	23,85
120	23,74	23,87	23,12	24,10	20,66	24,13	24,10	24,38	24,63	23,63

Berdasarkan data suhu diatas, pada tiap detiknya masing-masing probe dalam simulasi pola distribusi AC *perfect mixing* mencatat suhu udara yang berbeda-beda berdasarkan letaknya. Rata-rata seluruh suhu udara *probe* tipe ini mencapai suhu udara 24°C dalam waktu 112 detik.



**Gambar 5.** Tampak samping model ruang simulasi AC *displacement*



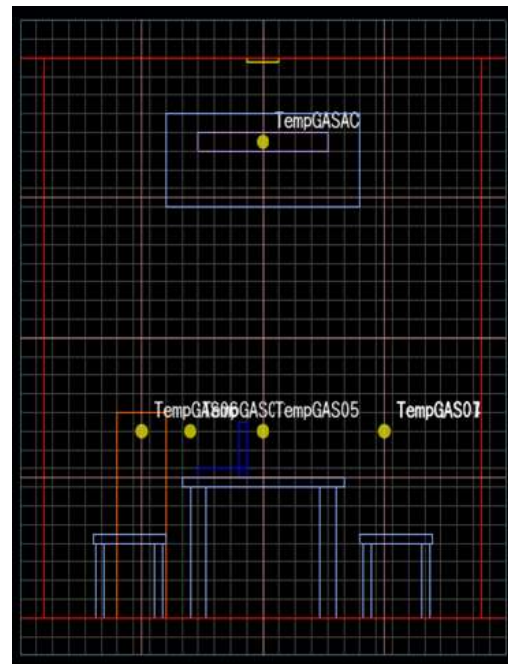
**Gambar 6.** Pergerakan angin sumbu X, Y, Z, hasil simulasi AC *displacement*

Selanjutnya, simulasi pola distribusi AC *displacement* dilakukan menggunakan model FDS pada Gambar 5. AC diletakkan pada ketinggian 20 cm dengan vent yang mengarahkan udara dingin horizontal menuju zona huni seperti Gambar 6. Pita warna bergradasi menunjukkan kecepatan angin yang terjadi dengan skala 0,0-1,0 m/s Adapun hasil simulasi *perfect mixing* tersusun pada Tabel 4 di bawah ini.

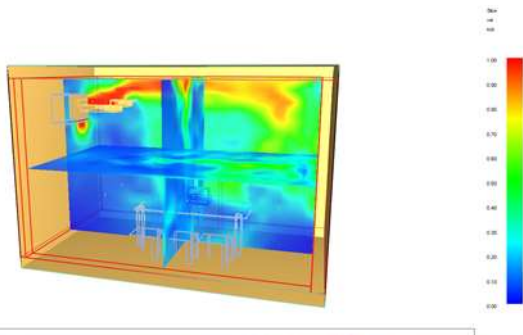
**Tabel 4.** Hasil simulasi suhu udara AC displacement di tiap probe berdasar waktu

Waktu (s)	Suhu udara Probe (TEMP-) (°C)									Rata-Rata (°C)
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	
0	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
10	27,84	27,84	27,84	27,93	27,85	27,84	27,84	27,84	27,84	27,85
20	25,34	27,56	25,49	27,76	27,70	27,69	27,70	27,70	27,70	27,18
30	26,28	25,07	25,80	25,87	25,68	27,20	27,57	27,57	27,56	26,51
40	25,36	26,58	25,50	26,48	26,82	25,68	26,24	26,42	27,30	26,26
50	24,34	25,82	26,20	25,17	25,64	26,25	26,20	25,96	25,87	25,71
75	25,10	23,80	23,48	23,88	25,16	24,38	24,71	24,56	25,14	24,46
76	24,90	23,78	23,05	23,97	25,07	24,42	24,64	24,51	25,24	24,39
77	24,53	23,74	22,92	24,07	24,86	24,51	24,45	24,49	25,26	24,31
78	24,21	23,70	22,95	24,15	24,63	24,55	24,24	24,46	25,16	24,23
79	24,14	23,70	23,05	24,19	24,51	24,46	24,20	24,44	24,94	24,18
80	23,88	23,48	23,12	24,21	24,51	24,34	24,24	24,42	24,83	24,11
81	22,69	22,92	23,20	24,21	24,54	24,21	24,29	24,40	24,70	23,90
82	23,41	21,56	23,48	24,03	24,72	23,89	24,30	24,27	24,05	23,74
83	23,71	22,35	23,52	23,95	24,74	23,75	24,16	24,19	23,90	23,80
84	23,87	22,61	23,52	24,00	24,74	23,64	24,16	24,14	22,88	23,72
85	23,24	22,10	23,57	24,03	24,75	23,60	24,20	24,14	23,13	23,64

Seperti halnya simulasi sebelumnya, pada saat bersamaan masing-masing probe dalam simulasi pola distribusi AC displacement merekam suhu udara yang berbeda-beda berdasarkan letaknya. Rata-rata seluruh probe pada tipe displacement ini mampu mencatat penurunan suhu udaranya menjadi 24°C dalam waktu 80 detik.



**Gambar 7.** Tampak depan model ruang simulasi AC radiant cooling



**Gambar 8.** Pergerakan angin sumbu X, Y, Z, hasil simulasi AC radiant cooling

Akhirnya, simulasi pola distribusi AC radiant cooling dijalankan berdasar model FDS pada Gambar 7. Sama halnya model *perfect mixing*, AC diletakkan pada ketinggian 2,2meter tetapi dengan *vent* yang diarahkan ke atas untuk mengalirkan udara dingin ke permukaan langit-langit seperti Gambar 8 di atas. Pita warna menunjukkan kecepatan angin dengan skala 0,0-1,0 m/s. Adapun kompilasi data hasil simulasi *radiant cooling* tersusun pada Tabel 5 di bawah ini.

**Tabel 5.** Hasil simulasi suhu udara AC radiant cooling di tiap probe berdasar waktu

Waktu (s)	Suhu udara Probe (TEMP-) (°C)									Rata-Rata (°C)
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	
0	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
10	27,85	27,85	27,85	28,05	27,76	27,85	27,86	27,85	27,85	27,86
20	26,49	26,53	26,15	26,78	26,64	26,37	27,57	27,63	27,62	26,86
30	26,20	25,99	25,62	27,00	26,91	26,79	27,28	27,23	27,16	26,68
40	26,27	25,81	25,55	26,84	26,83	26,02	26,54	27,09	26,91	26,42
50	25,50	25,22	25,71	26,06	25,75	26,05	26,25	26,26	26,07	25,87
400	23,78	23,66	23,82	24,07	24,55	24,90	24,50	24,70	24,72	24,30
410	23,40	23,82	24,40	24,11	24,96	24,83	24,89	24,87	24,57	24,42
420	24,41	24,71	23,96	24,58	24,59	23,98	24,64	24,49	24,58	24,43
430	24,22	24,44	24,55	25,52	25,62	24,21	24,63	24,64	24,63	24,71
440	22,89	23,45	24,02	25,23	25,13	23,98	24,70	23,80	24,40	24,28
450	22,93	24,05	24,20	24,57	24,31	24,35	24,90	23,90	24,50	24,30
460	23,30	23,50	24,30	24,53	24,28	24,45	24,80	24,30	24,20	24,18
470	24,67	23,78	23,71	25,67	25,09	24,15	24,81	24,51	24,33	24,52
480	24,50	23,36	23,82	25,39	24,99	24,40	24,80	24,60	24,28	24,46

Berdasarkan tabel di atas, simulasi *radiant cooling* yang dijalankan selama 480 detik (8 menit) kesulitan untuk mendapatkan suhu rata-rata *flat* 24°C. Maka untuk menyingkat waktu, penelitian mengambil nilai suhu rata-rata terendah yang mendekati 24°C, yaitu dalam 460 detik mencapai 24,18°C.

## Pembahasan

### A. Analisis kebutuhan waktu pencapaian suhu *setpoint* nyaman termal

Setelah seluruh skenario simulasi dilakukan, rekapitulasi data-data hasil simulasi *numerik*

komputer dengan FDS dapat diperbandingkan dalam Tabel 6 sebagai berikut.

**Tabel 6.** Perbandingan waktu mencapai suhu *setpoint* masing-masing AC

Tipe Distribusi Aliran Udara	Waktu untuk Mencapai Kenyamanan Termal 24°C (s)
<i>Perfect Mixing</i>	112
<i>Displacement</i>	80
<i>Radiant Cooling</i>	460

Berdasarkan perbandingan diatas, tipe distribusi *displacement* menjadi tipe distribusi aliran udara yang paling cepat mencapai kenyamanan termal karena prinsipnya yang

mendinginkan ruang langsung pada ruang huni, yaitu mengalirkan udara dingin pada ketinggian lantai (30-40 cm di atas lantai). Udara secara efektif dihembuskan langsung mengenai area kerja pengguna dan memindahkan kalor yang dikeluarkan oleh tubuh pengguna dan sumber kalor lain yang ada di dalam ruang. Kalor yang terbawa kemudian bergerak naik karena efek apungnya (*buoyancy*) sehingga terjadi pemisahan gradasi panas secara vertikal, yaitu bagian bawah ruang (zona huni) yang tetap dingin dan bagian atas (bukan zona huni) menjadi tempat pelepasan kalor untuk digantikan udaranya.

Kemudian, *perfect mixing* yang langsung mencampurkan udara dalam ruang tidak mengakibatkan terjadinya pemisahan kalor dalam ruang sehingga mengakibatkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu udara nyaman termal menjadi lebih lama dibandingkan tipe displacement.

Sedangkan tipe *radiant cooling* menjadi tipe yang paling tidak efektif untuk mencapai kenyamanan termal karena mengandalkan moda perpindahan kalor radiasi dengan cara hanya mendinginkan langit-langit atau *ceiling*. Permukaan langit-langit dingin ini kemudian akan menyerap panas tubuh pengguna dan panas permukaan ruangan disekitarnya secara radiasi.

## B. Analisis konsumsi energi pencapaian suhu setpoint nyaman termal

Untuk mempermudah perhitungan kebutuhan energi, maka ditentukan asumsi-asumsi sebagai berikut; (1) daya listrik yang bekerja saat mesin menyala dianggap konstan, yaitu tidak memperhitungkan lonjakan daya saat menyala (start) dan tidak mempertimbangkan kinerja part-load AC (AC dianggap selalu bekerja 100% seperti pada tipe AC *low-watt*), (2) energi listrik untuk kipas dan komponen elektronik AC lain tidak dipertimbangkan, (3) keberadaan beban kalor ditetapkan identik dan dikonversikan langsung ke dalam kebutuhan waktu kompresor AC untuk menyala kembali (dibuat tiga skenario waktu *idle* 30, 60, dan 90 detik untuk mengetahui efek seringnya mesin menyala), (4) kondisi termal ruang saat mesin AC menyala berulang dianggap sama seperti saat mesin AC menyala sebelumnya, sehingga perhitungan dilanjutkan menggunakan perkiraan waktu yang sama ketika AC bekerja menurunkan suhu sampai titik setpoint, (5) operasional mesin AC diasumsikan sepanjang 10 jam per hari seperti pada ruang kamar tidur rumah

tangga karena ruang ini umumnya paling lama menyalakan AC untuk aktivitas tidur.

Langkah pertama adalah menghitung energi listrik yang digunakan saat kompresor berdaya 680Watt menyala pertama kali sampai berhasil menurunkan suhu ruangan sesuai setpoint 24oC (1x on) pada masing-masing tipe distribusi AC (Tabel 7). Setelahnya, penelitian menghitung perkiraan berapa kali mesin AC menyala (N) dalam satu jam dengan tiga skenario konversi beban kalor (30, 60, dan 90 detik waktu jeda atau idle time) untuk mengetahui efek sering nyalamatinya mesin AC melalui persamaan;

$$N = (n+s) / 3600$$

dengan,

N = perkiraan berapa kali mesin AC menyala (on) dalam satu jam,

n = waktu yang dibutuhkan menuju setpoint,

s = waktu jeda (*idle time*) mesin AC (off).

**Tabel 7.** Perbandingan kebutuhan energi mencapai *setpoint* masing-masing tipe AC

Tipe AC	Waktu <i>setpoint</i> (s)	Daya mesin AC (Watt)	Energi listrik 1x menyala (Watt)
<i>Perfect Mixing</i>	112	680	21,16
<i>Displacement</i>	80	680	15,11
<i>Rad. Cooling</i>	460	680	86,89

Selanjutnya, N dikalikan dengan energi listrik (Watt) yang dibutuhkan saat mesin AC menyala lalu dikalikan lagi dengan tarif listrik PLN rumah tangga sebesar Rp. 1.467,28 kemudian dibagi 1000 untuk mengetahui biaya listrik yang dikeluarkan dalam satu jam (Satwiko 2009), seperti ditunjukkan oleh persamaan;

$$T_{jam} = N \times E \times TDL / 1000$$

Dengan,

T<sub>jam</sub> = Tarif listrik per jam (Rp.)

E = Energi listrik yang dibutuhkan mesin AC menuju setpoint (Watt)

TDL = Tarif Dasar Listrik PLN (Rumah Tangga >1.300 VA adalah Rp. 1.467,28).

Akhirnya, T<sub>jam</sub> dapat digunakan untuk mencari biaya listrik bulanan (T<sub>bulan</sub>) dan biaya listrik tahunan (T<sub>tahun</sub>) seperti dijabarkan dalam Tabel 8, Tabel 9, dan Tabel 10 dengan ketiga skenario waktu jeda. Untuk memperjelas studi komparasi, maka ditambahkan parameter besar simpangan masing-masing tipe distribusi AC dalam bentuk persentase (%) terhadap tipe displacement sebagai tipe yang telah terbukti paling cepat menurunkan suhu udara zona huni.

**Tabel 8.** Perbandingan kebutuhan energi mencapai *setpoint* waktu jeda 30 detik

Tipe AC	N (/jam)	Watt /jam (kWh)	Watt /bln (kWh)	Tarif /jam (Rp.)	Tarif /bulan (Rp.)	Tarif /tahun (Rp.)	%
<i>Perfect Mixing</i>	25,35	0,54	160,90	786,96	236.087,42	2.833.049,02	8,45
<i>Displacement</i>	32,72	0,49	148,36	725,64	217.691,00	2.612.291,96	-
<i>Rad. Cooling</i>	7,35	0,64	191,51	936,67	280.999,01	3.371.989,11	29,08

**Tabel 9.** Perbandingan kebutuhan energi mencapai *setpoint* waktu jeda 60 detik

Tipe AC	N (/jam)	Watt /jam (kWh)	Watt /bln (kWh)	Tarif /jam (Rp.)	Tarif /bulan (Rp.)	Tarif /tahun (Rp.)	%
<i>Perfect Mixing</i>	20,93	0,44	132,83	649,70	194.909,38	2.338.912,57	13,95
<i>Displacement</i>	25,71	0,39	116,57	570,14	171.042,93	2.052.515,11	-
<i>Rad. Cooling</i>	6,92	0,60	180,46	882,63	264.787,61	3.177.451,27	54,81

**Tabel 10.** Perbandingan kebutuhan energi mencapai *setpoint* waktu jeda 90 detik

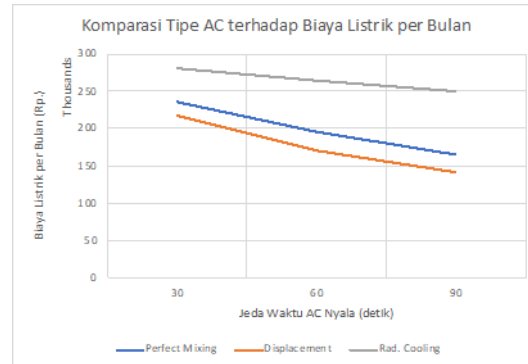
Tipe AC	N (/jam)	Watt /jam (kWh)	Watt /bln (kWh)	Tarif /jam (Rp.)	Tarif /bulan (Rp.)	Tarif /tahun (Rp.)	%
<i>Perfect Mixing</i>	17,82	0,38	113,11	553,21	165.962,44	1.991.549,31	17,82
<i>Displacement</i>	21,18	0,32	96,00	469,53	140.858,88	1.690.306,56	-
<i>Rad. Cooling</i>	6,55	0,57	170,62	834,48	250.344,66	3.004.135,75	77,73

Menurut hasil-hasil perhitungan diatas dengan waktu operasional 300 jam tiap bulan, tipe *displacement* menjadi pilihan paling efisien karena hanya membutuhkan biaya Rp. 217.691,00 (148,36 kWh/bulan), Rp. 171.042,93 (116,57 kWh/bulan), dan Rp. 140.858,88 (96 kWh/bulan) untuk waktu jeda 30, 60, dan 90 detik. Berikutnya, tipe *perfect mixing* menghabiskan dana Rp. 236.087,42 (160,90 kWh/bulan), Rp. 194.909,38 (132,83 kWh/bulan), dan Rp. 165.962,44 (113,11 kWh/bulan) pada masing-masing waktu jeda yang sama. Terakhir, tipe *radiant cooling* menjadi pilihan terboros dengan biaya Rp. 280.999,01 (191,51 kWh/bulan), Rp. 264.787,61 (180,46 kWh/bulan), dan Rp. 250.344,66 (170,62 kWh/bulan) di tiap-tiap waktu jeda per tahunnya. Selain itu, simpangan terbesar (77,73%) ditunjukkan oleh tipe AC *displacement* - *radiant cooling* dengan waktu jeda 90 detik. Sedangkan simpangan terkecil (8,45%) berada pada tipe *displacement* - *perfect mixing* dengan waktu jeda 30 detik.

## Kesimpulan

Tiga tipe AC dengan pola distribusi *displacement*, *perfect mixing*, dan *radiant cooling* diuji dengan metode simulasi *numerik* menggunakan program *Fire Dynamic Simulator* (FDS) tervalidasi untuk mengetahui pola yang paling efektif dalam mencapai suhu udara nyaman termal (24oC) berikut dengan estimasi biaya kebutuhan energi

listriknnya. Adapun berdasarkan hasil simulasi, perbandingan ketiga tipe AC tersebut dapat terangkum pada Gambar 9 dibawah ini.



**Gambar 9.** Grafik perbandingan biaya energi listrik per tahun masing-masing tipe AC

Dengan demikian, komparasi di atas dapat memberikan kesimpulan pengaruh tipe distribusi udara dalam ruang terhadap efisiensi energinya sebagai berikut:

1. Urutan efisiensi (dari yang paling efisien) untuk mencapai kenyamanan termal berdasarkan tipe distribusi aliran udara adalah pola distribusi *displacement*, *perfect mixing*, dan *radiant cooling*;
2. Simpangan lebar terlihat pada tipe *radiant cooling* terhadap kedua tipe distribusi udara AC lain menunjukkan moda perpindahan kalor radiatif, khususnya dengan spesifikasi AC sama, adalah tidak efisien menurunkan

- suhu udara dalam ruang dibandingkan moda konvektif;
3. Simpangan kecil terjadi pada tipe *displacement* dan *perfect mixing* karena keduanya sama-sama mengandalkan moda pertukaran kalor konveksi dan terjadi dalam ruang bervolume kecil (3 x 5m) saja;
  4. Semakin pendek waktu jeda mesin AC, maka pengaruh tipe distribusi udara tidak lagi signifikan terhadap konsumsi energinya karena mesin AC terus menerus menyala. Sebaliknya, jika beban kalor semakin kecil dan waktu jeda semakin panjang, maka peran tipe distribusi udara AC terhadap selisih konsumsi energi listrik akan semakin besar dan *displacement* semakin efisien mengungguli kedua tipe yang lain, dan
  5. Sebagai justifikasi bahwa dalam memilih AC harus memperhitungkan kapasitas pendinginan dan beban kalor ruangan yang ada, sehingga mesin AC dapat beristirahat dan tidak terus menerus terforsir menyala sehingga berakibat menghilangnya efek efisiensi energinya.

## Saran

Penelitian dapat dikembangkan untuk mengoptimalkan pola distribusi *perfect mixing* dan *radiant cooling* yang menurut penelitian ini kurang efisien dibandingkan pola distribusi *displacement*. Kemungkinan penggabungan atau penambahan dengan tipe-tipe distribusi yang lain akan dapat digunakan sebagai topik penelitian lanjutan dalam rangka mempertahankan keunggulan dan menutup kelemahan masing-masing tipe saat diaplikasikan bersamaan. Dengan demikian dapat diperoleh pola distribusi yang semakin efisien serta tetap efektif dalam upaya mengkondisikan udara dalam bangunan dan mencapai kenyamanan termalnya.

## Referensi

Ayoub, Mohamad, Nesreen Ghaddar, and Kamel Ghali. 2006. "Simplified Thermal Model of Spaces Cooled with Combined Positive Displacement Ventilation and Chilled Ceiling System." *HVAC and R Research*. <https://doi.org/10.1080/10789669.2006.10391448>.

- Chakroun, W., K. Ghali, and N. Ghaddar. 2011. "Air Quality in Rooms Conditioned by Chilled Ceiling and Mixed Displacement Ventilation for Energy Saving." *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.019>.
- Feng, Jingjuan, Stefano Schiavon, and Fred Bauman. 2013. "Cooling Load Differences between Radiant and Air Systems." *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.009>.
- JICA. 2009. *The Study on Energy Conservation and Efficiency Improvement in the Republic of Indonesia*. Jakarta: Japan International Cooperation Agency.
- Mori, H, H Shigekane, T Kubota, and M T Arethusa. 2015. "Comparative Analysis of Factors Influencing Window-Opening Behavior in Residential Buildings of Southeast Asia." In *The International Joint-Conference Senvar-Inta-Avan 2015 "Wisdom of The Tropics: Past Present & Future."*
- Mossolly, Mounir, Nesreen Ghaddar, Kamel Ghali, Lars Jensen, and Ashrae. 2008. "Optimized Operation of Combined Chilled Ceiling Displacement Ventilation System Using Genetic Algorithm." *ASHRAE Transactions*.
- Qiu-Wang, Wang, and Zhao Zhen. 2006. "Performance Comparison between Mixing Ventilation and Displacement Ventilation with and without Cooled Ceiling." *Engineering Computations (Swansea, Wales)*. <https://doi.org/10.1108/02644400610652965>.
- Satwiko, Prasasto. 2009. *Fisika Bangunan*. Yogyakarta: ANDI.
- Serra, Nuno, and Viriato Semiao. 2009. "Comparing Displacement Ventilation and Mixing Ventilation as HVAC Strategies through CFD." *Engineering Computations (Swansea, Wales)*. <https://doi.org/10.1108/02644400910996844>.
- Shan, Xin, Jin Zhou, Victor W.C. Chang, and En Hua Yang. 2016. "Comparing Mixing and Displacement Ventilation in Tutorial Rooms: Students' Thermal Comfort, Sick Building Syndromes, and Short-Term Performance." *Building and Environment*.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.025>.

- Surahman, U., and T. Kubota. 2012. "Life Cycle Energy and Co2 Emissions in Unplanned Residential Buildings of Indonesia : A Case Study in Bandung." In *Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012*.
- U.S. Energy Information, Administration. 2015. "Annual Energy Outlook 2015 with Projections to 2040." *Office of Integrated and International Energy Analysis*. [https://doi.org/DOE/EIA-0383\(2013\)](https://doi.org/DOE/EIA-0383(2013)).